

REC'D 13 JAN 2005

WIPO

PCT

IB/2004/05288-1



Europäisches  
Patentamt

European  
Patent Office

Office européen  
des brevets

Bescheinigung

Certificate

Attestation

Die angehefteten Unterlagen stimmen mit der ursprünglich eingereichten Fassung der auf dem nächsten Blatt bezeichneten europäischen Patentanmeldung überein.

The attached documents are exact copies of the European patent application described on the following page, as originally filed.

Les documents fixés à cette attestation sont conformes à la version initialement déposée de la demande de brevet européen spécifiée à la page suivante.

Patentanmeldung Nr. Patent application No. Demande de brevet n°

03104894.5 ✓

**PRIORITY  
DOCUMENT**

SUBMITTED OR TRANSMITTED IN  
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Der Präsident des Europäischen Patentamts;  
Im Auftrag

For the President of the European Patent Office

Le Président de l'Office européen des brevets  
p.o.

R C van Dijk





Europäisches  
Patentamt

European  
Patent Office

Office européen  
des brevets

Anmeldung Nr:

Application no.: 03104894.5 ✓

Demande no:

Anmeldetag:

Date of filing: 22.12.03 ✓

Date de dépôt:

Anmelder/Applicant(s)/Demandeur(s):

Koninklijke Philips Electronics N.V.  
Groenewoudseweg 1  
5621 BA Eindhoven  
PAYS-BAS  
Philips Intellectual Property & Standards  
GmbH  
Steindamm 94  
20099 Hamburg  
ALLEMAGNE

Bezeichnung der Erfindung/Title of the invention/Titre de l'invention:  
(Falls die Bezeichnung der Erfindung nicht angegeben ist, siehe Beschreibung.  
If no title is shown please refer to the description.  
Si aucun titre n'est indiqué se référer à la description.)

Elektronisches Geraet

In Anspruch genommene Priorität(en) / Priority(ies) claimed / Priorité(s)  
revendiquée(s)

Staat/Tag/Aktenzeichen/State/Date/File no./Pays/Date/Numéro de dépôt:

Internationale Patentklassifikation/International Patent Classification/  
Classification internationale des brevets:

H01L41/00

Am Anmeldetag benannte Vertragstaaten/Contracting states designated at date of  
filing/Etats contractants désignées lors du dépôt:

AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LU MC NL  
PT RO SE SI SK TR LI



## Elektronisches Gerät

Die Erfindung betrifft ein elektronisches Gerät mit einem Mikroelektromechanischen Schalter, der umfaßt:

- ein piezoelektrisches Element mit einem piezoelektrischen Schicht, der sich zwischen einem ersten und zweiten Elektrodenschicht befindet;
- 5 – eine erste und eine zweite MEMS Elektrode, welche erste MEMS Elektrode sich an einer Oberfläche des piezoelektrischen Elementes befindet und welche zweite MEMS Elektrode sich an der Oberfläche eines Substrates befindet, welche erste MEMS Elektrode unter Anwendung einer Aktuationsspannung auf das piezoelektrische Element von und/oder zu der zweiten MEMS Elektrode.

10

Ein derartiges Gerät ist bekannt aus der Literatur. Mikro-Elektromechanische Schalter (MEMS) stellen eine interessante Alternative zu Halbleiterschaltern dar. Insbesondere die Aussicht, die intrinsische Kapazitäten der Halbleiterschalter zu vermeiden und gleichzeitig geringere Durchgangswiderstände zu erreichen, haben MEMS in den letzten 15 Jahren in den Mittelpunkt einer regen Forschungs- und Entwicklungstätigkeit gerückt. Erste Produkte werden zwar bereits verwendet, aufgrund der relativ hohen Schaltspannungen beschränken sie sich bisher aber auf Anwendungen, die diese zur Verfügung stellen können. An Lösungen, die bei Spannungen unterhalb von 5 V arbeiten besteht insofern besonderes 20 Interesse, als dass sich den MEM's damit das gesamte Gebiet der mobilen Telekommunikation erschließen würde. Aus diesem Grund wird verstärkt an Piezo-MEMS geforscht, da deutlich geringere Schaltspannungen benötigt werden als dies bei rein elektrostatisch geschalteten MEMS der Fall ist.

Figur 1 zeigt eine Prinzipskizze einer einseitig geklemmten und einer 25 zweiseitig geklemmten Platte aus Piezokeramik, dem Herzstück eines Piezo-MEMS. Das grundsätzliche Prinzip ist in beiden Fällen das gleiche. Auf der Piezokeramik sind auf der Ober- und Unterseite Elektroden angebracht, die bei angelegter Spannung dafür sorgen, dass sich Piezokeramik zusammen zieht oder ausdehnt. Dabei wird in der dargestellten Konfiguration der  $d_{31}$  Piezokoeffizient verwendet, d. h. die Piezokeramik ist entlang der

Flächennormalen der Elektroden in +z-Richtung polarisiert. Die Biegung des Piezo-MEMS wird nun durch einen Gradienten in der Steifigkeit erzeugt. Dementsprechend können die Elektroden auf der Ober- und Unterseite aus den gleichen Metallen bestehen, müssen dann aber unterschiedliche Schichtdicken aufweisen oder es werden unterschiedliche

5 Elektrodenmaterialien mit verschiedenen Steifigkeiten verwendet. Eine Kombination aus beiden Prinzipien ist ebenfalls möglich.

Figur 2 zeigt beide Schalter, wenn zwischen Oberseite und Unterseite eine Spannung angelegt wird. Der einseitig geklemmte Schalter hat den Vorteil, dass schon eine geringe Spannung ausreicht, um zu schalten (große Auslenkung bei geringer Spannung). Der  
10 zweiseitig geklemmte Schalter verspricht hingegen die größere mechanische Stabilität, benötigt aber eine deutlich höhere Spannung, um die gleiche Auslenkung zu erreichen wie der einseitig geklemmte Schalter. Betrachtet man den beidseitig geklemmten Schalter allerdings etwas näher, so zeigt sich, dass die Biegeform beim Anlegen der Spannung sehr ungünstig ist. Wie Figur 3 zeigt würde dieser Schalter nur an den Kanten geschlossen  
15 werden, was eine große Impedanz zur Folge haben würde. In dieser Konfiguration stellt der beidseitig geklemmte Schalter trotz seiner mechanischen Vorteile keine Alternative zum einseitig geklemmten Schalter dar.

20 Es ist daher ein Ziel der vorliegenden Erfindung um ein Gerät der in den Anfangsabsatz genannten Art vorzulegen, das ein MEMS-Schalter mit niedrigen Schaltspannungen und trotzdem einer guten mechanischen Stabilität hat.

Dieses Ziel ist dadurch erreicht worden, daß

- das piezoelektrische Element an einer ersten und einer zweiten gegenüberliegenden Seite  
25 an mechanischen Unterstützungen verbunden ist, und
- der erste Elektrodenschicht des piezoelektrischen Elementes zumindest zwei Elektroden enthält.

Gemeint ist mit den gegenüberliegenden Seiten nicht die üblich als Unter- und Oberseite gekennzeichnete Seiten, sondern die „Rand“ oder die „auseinanderliegenden  
30 Enden“ des piezoelektrischen Elementes, wozwischen sich, des Substrates parallel angeordnet, das verformbare piezoelektrische Element befindet. Das piezoelektrische Element ist also „beam-shaped“. Die Literatur spricht auch über beidseitig geklemmt.

Gefunden worden ist daß ein derartig doppelseitig festgelegtes (Englisch: clamped) piezoelektrisches Element zusammen mit dem Elektrodenentwurf gute



Verformungscharakteristike hat. Diese Charakteristike bewirken eine große Verformung bei niedrigem elektrischem Felde, ohne daß zu große mechanischen Spannungen auftreten, die den Lebensdauer erheblich beschränken würden.

Der Schalter kann sowohl ein kapazitiver wie ein galvanischer Schalter sein.

- 5 Außerdem kann der Schalter als Resonator und als Sensor benützt werden. Der piezoelektrische Schicht enthält vorzugsweise ein Material mit Perowskitstruktur, wie zum Beispiel die Materialien aus der Gruppe der Blei-Zirkonat-Titanate, und ähnlichem, dem Fachmann bekannt als  $\text{PbZrTiO}_3$ ,  $\text{Pb}(\text{X}_a\text{Nb}_b)\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ , mit  $a = 0.33$  oder  $0.5$  und  $b = 1-a$  und  $X = \text{In, Mn, Mg, Y, Er, Zn, Ni, Sc, oder anderes, und mit oder ohne Dotierungen von La,}$
- 10  $\text{Mn, Fe, Sb, Sr, Ni, W}$  oder Kombination davon. Solche Materialien können auf mehreren Weisen auf das Substrat gebracht werden, wie dem Fachmann bekannt. Das piezoelektrische Element kann weiterhin einen strukturellen Schicht umfassen, aber eine Assymetry in der Bendung kann ebenso mit unterschiedlichen Elektrodenschichten bewirkt werden. Verschiedene Möglichkeiten zu der Herstellung solcher MEMS Elemente sind weiterhin an
- 15 sich bekannt.

In einer ersten Ausführungsform ist auch der zweite Elektrodenschicht in mehreren Elektroden strukturiert worden. Bevorzugt gibt es pro Schicht zumindest drei Elektroden und sind die Strukturierungen gleich, zumindest im Bereich des bewegbaren Teils des piezoelektrischen Elementes. Dies führt zu den folgenden Konfigurationen:

- 20 1. Schalter mit dielektrischer Schicht auf der Gegenelektrode
- a) die untere Mittenelektrode führt das Signal, welches im geschlossenen Zustand kapazitiv in die Gegenelektrode (oder umgekehrt) einkoppelt
  - b) die obere Mittenelektrode führt das Signal, das im offenen Zustand in die untere Mittenelektrode einkoppelt. Im geschlossenen Zustand wird das Signal

25 über das Dielektrikum auf der Gegenelektrode kurzgeschlossen
2. Schalter ohne dielektrischer Schicht auf der Gegenelektrode
- a) der galvanische Kontakt zwischen unterer Mittenelektrode und der Gegenelektrode ermöglicht einen DC-Schalter
  - b) die obere Mittenelektrode führt das Signal, das im offenen Zustand in die

30 untere Mittenelektrode einkoppelt und somit die Gegenelektrode eingekoppelt.

Bei der Steuerung werden zwei Modi unterschieden: ein Polarisationsmodus und ein Arbeitsmodus. Das Polarisationsmodus bewirke dass das Teil des piezoelektrischen Schichtes der zweiten MEMS Elektrode gegenüber in der entgegengesetzten Richtung gepolt ist, wie die Teile die nebenan geordnet sind.

In einer anderen Ausführungsform ist der zweite Elektrodenschicht ein ununterbrochene Metallschicht und enthält der erste Elektrodenschicht zumindest drei Elektroden, wovon die mittlere gegenüber der zweiten MEMS Elektrode angeordnet ist.

Auch hier lassen sich verschiedene Konfigurationen unterscheiden:

- 5        1) Das Signal läuft bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Unterelektrode und wird bei geschlossenem Schalter galvanisch kurzgeschlossen (Figur 4 links)
- 2) Das Signal läuft bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Oberelektrode und wird bei geschlossenem Schalter kapazitiv über die Piezokeramik kurzgeschlossen (Figur 4 mitte)
- 10       3) Das Signal läuft bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Unterelektrode und wird bei geschlossenem Schalter kapazitiv über die mit einem Dielektrikum bedeckte Gegenelektrode kurzgeschlossen (Figur 4 rechts).

Auch in dieser Ausführungsform gibt es unterschiedliche Betriebsmodi, d.h. den Polarisationsmodus und den Arbeitsmodus.

- 15        In einer besonderen Variante dieser Ausführungsform ist der zweite Elektrodenschicht an der Oberfläche angeordnet, die nach der zweiten MEMS Elektrode aussieht. Sie ist dadurch gekennzeichnet daß die mittlere Elektrode der erste Elektrodenschicht parallel zu der Fläche durch das piezoelektrische Element eine geringe Ausdehnung hat, so daß unter Anwendung einer Aktuationsspannung zwischen den
- 20       Elektroden an gegenüberliegenden Seiten des piezoelektrischen Schichtes eine Verformung des piezoelektrischen Schichtes in einer Richtung parallel zu dem von der Aktuationsspannung erzeugten elektrischen Feldes statt findet. Piezokeramik kann grundsätzlich in verschiedenen Richtungen verformen, wovon hier zwei relevant sind: die Richtung parallel zu dem elektrischen Feld ( $d_{33}$ ) und die Richtung quer zu dem elektrischen
- 25       Felde ( $d_{31}$ ). Üblicherweise wird wohl die zweite Richtung benützt, obwohl die eine kleinere Ausdehnung pro Einheit an Aktuationsspannung hat. Mit der Maßnahme dieser Variante ist es aber möglich die erste Richtung auszunützen.

- 30        Diese und andere Aspekte der Erfindung werden weiterhin erklärt mit den folgenden Zeichnungen, worin:

Figur 1: Prinzipskizze eines einseitig bzw. zweiseitig geklemmten Piezo-MEM mit einer Elektrode auf der Ober- bzw. Unterseite zeigt,



Figur 2: eine Wiedergabe der Auslenkung beider Schalter zeigt, wenn eine Spannung an die Elektroden angelegt wird,

Figur 3: eine Wiedergabe der Auslenkung des beidseitig geklemmten Schalters aus verschiedenen Blickwinkeln zeigt. Das Biegeprofil zeigt einen ungünstigen Verlauf, da die Kontaktfläche durch die starke zusätzliche Krümmung in der Mitte sehr klein ist,

Figur 4: Prinzipskizze Schalter bzw. schaltbarer Kondensatoren nach einer ersten Ausführungsform der Erfindung zeigt,

Figur 5: Beidseitig geklemmter Schalter mit zwei Elektroden auf der Oberseite und zwei Elektroden auf der Unterseite zeigt,

Figur 6: den Schalter der Erfindung nach im Polarisations-Modus (links) bzw. Arbeitsmodus (rechts) zeigt. Die angegebene Spannungen sind exemplarisch, so können z. B. die Seitenelektroden eine andere Spannung als die Mittelelektroden haben,

Figur 7: das Biegeprofil des Schalters im Arbeits-Modus zeigt,

Figur 8: Verschiedene Anschlusskonfigurationen der Elektroden zeigt,

Figur 9: Prinzipskizze Schalter bzw. schaltbarer Kondensatoren der Erfindung nach einer zweiten Ausführungsform,

Figur 10: diese beidseitig geklemmter Schalter der zweiten Ausführungsform mit einer Elektrode auf der Oberseite und zwei Elektroden auf der Unterseite wie oben beschrieben. Auf der rechten Seite ist eine mögliche Elektrodenkonfiguration gezeigt,

Figur 11: diesen Schalter der zweiten Ausführungsform im Polarisations-Modus (links), in dem die Piezokeramik an den Rändern in  $-z$ -Richtung und in der Mitte in  $+z$ -Richtung polarisiert wird und dem. Arbeitsmodus (rechts). Die angegebene Spannungen sind exemplarisch, so können z. B. die Seitenelektroden eine andere Spannung als die Mittelelektrode haben,

Figur 12: Verschiedene Anschlusskonfigurationen der strukturierten Elektrode zeigt,

Figur 13: eine weitere Skizze des Schalters in der zweiten Ausführungsform zeigt, und zwar in der besonderen Variante. Beidseitig geklemmte Piezokeramik, die unter Ausnutzung der des  $d_{33}$  Piezokoeffizient ausgelenkt wird. Die Spannungsabfolge ist so gewählt, dass sich die Piezokeramik an den Seiten entlang der Polarisationsachse ausdehnt. Da die elektrische Feldstärke an der Oberseite der Piezokeramik zwischen den Elektroden mit unterschiedlichen Potentialen maximal ist, dehnt diese sich am stärksten aus, so dass die Piezokeramik im Seitenbereich nach unten gekrümmt ist. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass sich die Piezokeramik unterhalb der Pt-Elektroden in die vertikale Richtung

ausdehnt und somit in der lateralen zusammenzieht. Da die Pt-Elektrode steifer ist als die Aluminiumelektrode (solange die Aluminiumschicht nicht wesentlich dicker als die Platinschicht ist), ist auch dieser Bereich nach unten gekrümmt. Durch den Wechsel in der Spannungsabfolge wechselt in der Mitte der Piezokeramik das Krümmungsverhalten,

5           Figur 14: Prinzipskizze des Schalters nach der besonderen Ausführungsforms zeigt, und zwar mit Verhalten in dem Polarisationsmodus (links) und Arbeitsmodus (rechts) . An der durchgehenden Unterelektrode liegt in beiden Fällen eine Spannung von 5 V an,

Figur 15: Simuliertes Biegeprofil der zweiten Ausführungsform zeigt, und

10           Figur 16: Simuliertes Biegeprofil der besonderen Variante der zweiten Ausführungsform zeigt.

Der prinzipielle Aufbau des piezoelektrischen Schalters bzw. der schaltbaren Kapazität wird in Figur 4 dargestellt. Es gibt grundsätzlich zwei mögliche Konfigurationen, die verschiedene Betriebsmodi ermöglichen.

-           Schalter mit dielektrischer Schicht auf der Gegenelektrode

a) die untere Mittenelektrode führt das Signal, welches im geschlossenen Zustand kapazitiv in die Gegenelektrode (oder umgekehrt) einkoppelt

20   b) die obere Mittenelektrode führt das Signal, das im offenen Zustand in die untere Mittenelektrode einkoppelt. Im geschlossenen Zustand wird das Signal über das Dielektrikum auf der Gegenelektrode kurzgeschlossen

-           Schalter ohne dielektrischer Schicht auf der Gegenelektrode

a) der galvanische Kontakt zwischen unterer Mittenelektrode und der Gegenelektrode ermöglicht einen DC-Schalter

25   b) die obere Mittenelektrode führt das Signal, das im offenen Zustand in die untere Mittenelektrode einkoppelt und somit die Gegenelektrode eingekoppelt.

30           Figur 5 zeigt einen der Erfindung zu Grunde liegenden beweglichen Teil des Schalters (Die Gegenelektrode, ob galvanisch oder kapazitiv „kontaktiert“ ist nicht dargestellt). Der Aufbau des erfindungsgemäßen Schalters zeichnet sich dadurch aus, dass auf beiden Seiten der Piezokeramik mindestens zwei Elektroden aufgebracht sind, deren Potentiale unabhängig voneinander gesteuert werden können. Dabei werden zwei Modi unterschieden:

Im Polarisations-Modus wird die Piezokeramik in +z-Richtung gepolt, d. h. die Elektroden auf einer Seite der Piezokeramik befinden sich auf gleichem Potential (Figur 6 links). Im Arbeitsmodus alterniert die Spannungsfolge wie in Figur 6 rechts gezeigt

Die Spannungsabfolgen von Polarisationsmodus und Arbeitsmodus werden  
5 vertauscht, so dass die Piezokeramik z. B. an den Seiten in +z-Richtung gepolt ist und unterhalb der Mittenelektroden in -z-Richtung.

Hat die Piezokeramik die Länge  $4L$ , so beträgt die Länge der Seitenelektroden ca.  $L$  und die Länge der Mittenelektrode ca.  $2L$ , um eine möglichst große Auslenkung der Piezokeramik bei geringer Schaltspannung zu erreichen. Der Isolationsspalt zwischen den  
10 Elektroden sollte auf das technologische Minimum reduziert werden.

Die Elektrodenmaterialien werden so gewählt, dass die Elastizitätsmoduln möglichst unterschiedlich sind, da dies in Kombination mit den Schichtdicken der Elektroden die Krümmung der Piezokeramik vergrößert. Die Unterelektrode besteht bevorzugt aus Platin mit einem Elastizitätsmodul von 165 GPa und die Oberelektrode  
15 besteht gemäß obiger Ausführungen bevorzugt aus Aluminium, das ein Elastizitätsmodul von nur ca. 71 GPa hat. Konkret bedeutet dies, dass eine beidseitig geklemmte Piezokeramik von  $200 \times 50 \mu\text{m}$  mit einer Dicke von  $0,5 \mu\text{m}$  eine Auslenkung maximale Auslenkung von  $0,73 \mu\text{m}$  bei 1 V Spannung erreicht, wenn die Dicke der Unterelektrode aus Platin  $0,1 \mu\text{m}$  beträgt und die Schichtdicke der Aluminium Oberelektrode  $0,31 \mu\text{m}$  beträgt. Dies bringt eine  
20 Verbesserung von ca. 70 Prozent im Vergleich zu einer Platinoberelektrode mit optimierter Schichtdicke. Somit können bei gleicher Spannung höhere Schaltwege zurückgelegt werden oder gleiche Schaltwege bei geringerer Spannung. Ersteres vergrößert die potenzielle Kraft, die der Schalter auf die Gegenelektrode aufbringen kann, so dass ein großflächiger Kontakt gewährleistet wird, letzteres reduziert die Anforderungen an die Spannungsversorgung und  
25 erhöht somit den Einsatzbereich dieser Mikroschalter.

Nahezu unabhängig von den Elektrodenmaterialien erreicht die Auslenkung der beidseitig geklemmten Piezokeramik mit einer bevorzugten Schichtdicke zwischen  $0,3 \mu\text{m}$  und  $1 \mu\text{m}$  (dünner, wenn technologisch möglich) ihr Maximum, wenn das Verhältnis der Schichtdicken der Elektroden zwischen 1 zu 2 bzw. 1 zu 6 liegt.

30 Diese Elektrodenkonfiguration in Verbindung mit der Auswahl der Elektrodenmaterialien und deren Schichtdicken bewirken zusammen mit der oben beschriebenen Beschaltung, dass die Piezokeramik an beiden Rändern linksgekrümmt ist und in der Mitte rechtsgekrümmt. Das Krümmungsverhalten der Piezokeramik entspricht somit dem durch die Randbedingungen (beide Seiten des Schalters fixiert) aufgezwungene und



wird durch die Wahl der Elektrodenmaterialien unterstützt. Dies vergrößert die Auslenkung des Schalters bei gleicher Spannung um den Faktor fünf im Vergleich zu nur einer Elektrode auf Ober- und Unterseite, wenn ansonsten alle Materialien und Schichtdicken für die jeweilige Konfiguration optimiert sind. Simulationen mit dem Softwaretool Ansys 6.0  
5 ergaben für eine doppelseitig geklemmte Piezokeramik mit den oben beschriebenen Abmessungen  $200\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$  und einer Spannung von Schaltspannung von 1 V eine etwa fünfmal größere Auslenkung als bei durchgehender Ober- bzw. Unterelektrode aber ansonsten optimierten Elektrodenmaterialien und Schichtdicken (Figur 3). Des weiteren verändert sich das Biegeprofil in der Art, dass eine große Kontaktfläche und somit ein  
10 geringer Widerstand gewährleistet ist (Figur 7). Die beschriebene Konfiguration lässt sich ebenfalls als eine Elektrode einer steuerbaren Kapazität verwenden.

Figur 8 zeigt verschieden Konfigurationen, um die geteilten Elektroden anzusteuern. Die linke Hälfte der Darstellung zeigt jeweils die Unterseite der mit Elektroden (schraffiert) bedeckten Keramik, während auf der rechten Seite die Oberseite zeigt. In der  
15 obersten Konfiguration laufen die Elektroden über die gesamte Breite der Piezokeramik. Die Elektroden auf der Unterseite sind Spiegelbildlich zu denen auf der Oberseite angebracht, damit die Kräfte symmetrisch bleiben. In der mittleren Konfiguration wird die Mittenelektrode nur von einer Seite angeschlossen. Auch hier sind die Elektroden auf der Unterseite aus Symmetriegründen wieder spiegelsymmetrisch angeordnet. In der unteren  
20 Anordnung ist die Mittenelektrode der Oberseite mit einem dritten Fußpunkt verbunden. Diese Konfiguration bietet die Möglichkeit das Signal über eine breite Leitung mit geringen Verlusten zur Mittenelektrode zu übertragen (Aus Symmetrie kann auch ein weiterer Fußpunkt hinzugefügt werden).

Figur 9 zeigt einen prinzipiellen Aufbau eines piezoelektrischen Schalters  
25 bzw. der schaltbaren Kapazität in der zweiten Ausführungsform der Erfindung. Bei diesem gibt grundsätzlich drei mögliche Konfigurationen, die dadurch charakterisiert sind, dass die durchgehende Elektrode das Signal führt:

- das Signal läuft bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Unterelektrode und wird bei geschlossenem Schalter galvanisch kurzgeschlossen (Figur 9  
30 links)
- das Signal läuft bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Oberelektrode und wird bei geschlossenem Schalter kapazitiv über die Piezokeramik kurzgeschlossen (Figur 9 mitte)

- das Signal läuft bei geöffnetem Schalter entlang der durchgehenden Unterelektrode und wird bei geschlossenem Schalter kapazitiv über die mit einem Dielektrikum bedeckte Gegenelektrode kurzgeschlossen (Figur 9 rechts).

Figur 10 zeigt einen dieser Ausführungsform der Erfindung zu Grunde liegenden beweglichen Teil des Schalters (Die Gegenelektrode, ob galvanisch oder kapazitiv „kontaktiert“ ist nicht dargestellt). Der Aufbau des erfindungsgemäßen Schalters zeichnet sich dadurch aus, dass auf einer Seite der Piezokeramik mindestens zwei Elektroden aufgebracht sind, deren Potentiale unabhängig voneinander gesteuert werden können. Die Elektrode auf der anderen Seite der Piezokeramik ist hingegen durchgehend.

10 Es werden zwei Betriebsmodi unterschieden:

Im Polarisations-Modus wird die Piezokeramik im Bereich der Seitenelektroden in -z-Richtung (oder umgekehrt) gepolt während sie im Bereich der Mittenelektrode in +z-Richtung (oder umgekehrt) gepolt wird, d. h. das Potential der strukturierten Elektroden auf z. B. der Unterseite der Piezokeramik (Figur 11 links) alterniert. Bei der Herstellung werden

15 somit mindestens drei verschiedene elektrische Potentiale benötigt.

Im Arbeitsmodus werden hingegen nur noch zwei verschiedene Potentiale benötigt (Figur 11 rechts).

20 Die Spannungsabfolgen von Polarisationsmodus und Arbeitsmodus können prinzipiell auch vertauscht werden, was allerdings größere Ansprüche an die Steuerelektronik in der Applikation stellt.

Hat die Piezokeramik die Länge  $4L$ , so beträgt die Länge der Seitenelektroden ca.  $L$  und die Länge der Mittenelektrode ca.  $2L$ , um eine möglichst große Auslenkung der Piezokeramik bei geringer Schaltspannung zu erreichen. Der Isolationsspalt zwischen den

25 Elektroden sollte auf das technologische Minimum reduziert werden.

Die Elektrodenmaterialien werden so gewählt, dass zum einen eine möglichst große Auslenkung erreicht wird, zum anderen die Leitfähigkeit des Materials, das für die durchgehende Metallisierung verwendet wird, möglichst groß ist. Bevorzugt würde Platin als dünne strukturierte Elektrode verwendet werden und eine dickere Aluminiumschicht als

30 unstrukturierte Elektrode. Insbesondere für die unstrukturierte Elektrode bieten sich aber auch Materialien mit einer höheren elektrischen Leitfähigkeit wie Kupfer, Silber oder Gold an.

Nahezu unabhängig von den Elektrodenmaterialien erreicht die Auslenkung der beidseitig geklemmten Piezokeramik mit einer bevorzugten Schichtdicke zwischen  $0.3$

$\mu\text{m}$  und  $1\ \mu\text{m}$  (dünner, wenn technologisch möglich) unter Verwendung dieser Elektrodenkonfiguration ihr Maximum, wenn das Verhältnis der Schichtdicken der Elektroden zwischen 1 zu 2 bzw. 1 zu 10 liegt.

Figur 12 zeigt verschiedene Konfigurationen, um die strukturierte Elektrode anzusteuern. Die Kontaktierung der Mittenelektrode kann mittels sehr schmaler Verbindungen erfolgen, da über diese kein Signal geleitet wird. Der Einfluss auf die Auslenkung der Piezokeramik wird somit minimiert. In der oberen Anordnung ist die Mittenelektrode mit einem dritten Fußpunkt verbunden.

Eine weitere Variante dieser Ausführungsform eines doppelseitig geklemmten Schalters, die eine komplette Metallisierung einer Seite der Piezokeramik ermöglicht, ist in Figur 13 dargestellt. Im Vergleich zur zuvor beschriebenen Konfiguration, die den  $d_{31}$  Piezokoeffizienten zur Auslenkung des Schalters ausnutzt, wird in diesem Fall der  $d_{33}$  Piezokoeffizient ausgenutzt. Der Vorteil besteht darin, dass bei gleicher elektrischer Spannung die Verformung der Piezokeramik entlang der Polarisierungsachse ca. dreimal größer ist als diejenige senkrecht zur Polarisierungsachse. Dieser Vorteil kommt insbesondere bei einer sehr feinen Strukturierung der Oberelektrode zum Tragen.

Von den in Figur 9 Schalterkonfigurationen sind aufgrund der feinen Strukturierung der Oberelektrode nur die Rechte und die Linke möglich.

Die Auslenkung des Schalters lässt sich auch bei dieser Konfiguration optimieren, indem das Krümmungsverhalten der Piezokeramik an die beidseitige Klemmung angepasst wird. Dies geschieht durch die Veränderung der Spannungsabfolge zwischen 1/10 bzw. 4/10 bevorzugt  $\frac{1}{4}$  der Gesamtlänge der Piezokeramik und zwischen 6/10 bzw. 9/10 bevorzugt  $\frac{3}{4}$  der Gesamtlänge der Piezokeramik. Dementsprechend ist es, wie in Figur 9 dargestellt, erforderlich, dass die Spannungsabfolge im Polarisierungsmodus und Arbeitsmodus unterschiedlich ist. Eine Vertauschung der beiden Modi ist ebenfalls möglich. Des Weiteren können die Spannungen in Abhängigkeit von der Polarisierung der Piezokeramik im Arbeitsmodus auch unterschiedlich gewählt werden, so dass die Spannung an den Seiten der Piezokeramik zwischen z. B. 5 V und 0 V variiert und in der Mitte z. B. zwischen 1 V und 0 V (oder umgekehrt), um Depolarisationseffekte zu vermeiden.

Das Potential der durchgehenden Kontaktelektrode ist, um eine maximale Auslenkung bei kleinen Spannungen zu erhalten, so zu wählen, dass die Verformung der Piezokeramik unterhalb der strukturierten Elektroden in Verbindung mit den Steifigkeiten und Schichtdicken der Elektroden die Auslenkung der Piezokeramik unterstützt. Ein Beispiel mit Erläuterung ist in Figur 14 gezeigt.



Ist der Schalter ohne angelegte Spannung offen, d. h. die Piezokeramik ist nicht ausgelenkt, so ist Polarisierung und Spannungsabfolge so abzustimmen, dass die komplett metallisierte Oberfläche der Piezokeramik bei Anlegen der Arbeitsspannung nach außen gewölbt ist. Alternativ kann die Piezokeramik auch mechanisch vorgespannt sein, so dass der Schalter ohne Arbeitsspannung schließt. In diesem Fall ist die Polarisierung und Spannungsfolge so abzustimmen, dass die komplett metallisierte Oberfläche der Piezokeramik bei Anlegen der Arbeitsspannung nach innen gewölbt ist.

Beide Konfigurationen der zweiten Ausführungsform in Verbindung mit der Auswahl der Elektrodenmaterialien und deren Schichtdicken bewirken zusammen mit der oben beschriebenen Beschaltung, dass das Krümmungsverhalten der Piezokeramik zwischen den Rändern und der Mitte wechselt. Dementsprechend wird den Randbedingungen (beide Seiten des Schalters fixiert) genüge getan. Durch die Wahl der Elektrodenmaterialien wird dieses Verhalten noch unterstützt. Dies vergrößert die Auslenkung des Schalters bei gleicher Spannung. Die resultierenden Biegeprofile beider Konfigurationen sind in den Figuren 15 und 16 zu sehen.

Die beschriebene Konfiguration lässt sich ebenfalls als eine Elektrode einer steuerbaren Kapazität verwenden.

Zusammengefaßt:

Die Erfindung beschreibt einen neuartigen, zweiseitig geklemmten Piezo-Elektromechanischen-Schalter (P-MEMS), der trotz einer extrem kleinen Baugröße aufgrund seines besonderen Elektrodendesigns in Verbindung mit der darauf abgestimmten elektronischen Ansteuerung, dem Elektrodenmaterial und deren Schichtdicke in der Lage ist, Schaltwege von mehreren  $\mu\text{m}$  zu überwinden. Gleichzeitig ergibt sich eine sehr ebene Kontaktfläche was zu einer Verminderung des Übergangswiderstandes führt. Im Vergleich zu einseitig geklemmten Schaltern ist eine deutlich erhöhte mechanische Stabilität gewährleistet.

Der Vorteil Piezo-Elektromechanischen-Schalter (P-MEMS) ist eine Reduktion der Schaltspannung auf weniger als 5 V, um den Einsatz solcher Komponenten in mobilen Applikationen zu ermöglichen. Neben diesem Aspekt ist es von größter Wichtigkeit die Verluste so gering wie möglich zu gestalten. Die beschriebene Erfindung trägt allen diesen Forderungen Rechnung.

In der ersten Ausführungsform gibt es strukturierte Elektroden an beiden Seiten des piezokeramischen Schichtes, wodurch Teile der Piezokeramik auf unterschiedliche Weise angesteuert werden können.

In der zweiten Ausführungsform wird durch eine komplette Metallisierung einer Seite der Piezokeramik der Widerstand dieser signalführenden Metallschicht des doppelseitig geklemmten Schalters drastisch verringert. Gleichzeitig ermöglicht das spezielle Elektrodendesign trotz einer extrem kleinen Baugröße (z. B.  $200\text{ }\mu\text{m} \times 50\text{ }\mu\text{m}$ ), Schaltwege von mehreren Mikrometern bei einer Schaltspannung von weniger als 5 Volt zu überwinden und gewährleistet, aufgrund der Abstimmung des Krümmungsverhaltens der Piezokeramik auf die (doppelseitige) Klemmung, einen großflächigen und somit verlustarmen Kontakt zur Gegenelektrode.

## ANSPRÜCHE:

1.           Elektronisches Gerät mit einem Mikroelektromechanischen Schalter, der umfaßt:

– ein piezoelektrisches Element mit einem piezoelektrischen Schicht, der sich zwischen einem ersten und zweiten Elektrodenschicht befindet, in jedem welcher

5       Elektrodenschichten mindestens eine Elektrode angeordnet ist;

– eine erste und eine zweite MEMS Elektrode, welche erste MEMS Elektrode sich an einer Oberfläche des piezoelektrischen Elementes befindet und welche zweite MEMS Elektrode sich an der Oberfläche eines Substrates befindet, welche erste MEMS Elektrode unter Anwendung einer Aktuationsspannung auf das piezoelektrische Element

10       von und/oder zu der zweiten MEMS Elektrode,

dadurch gekennzeichnet, daß:

– das piezoelektrische Element an einer ersten und einer zweiten gegenüberliegenden Seite an mechanischen Unterstützungen verbunden ist, und

– der erste Elektrodenschicht des piezoelektrischen Elementes zumindest zwei Elektroden

15       enthält.

2.           Elektronisches Gerät nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet daß auch der zweite Elektrodenschicht des piezoelektrischen Elementes zumindest zwei Elektroden

20       enthält.

3.           Elektronisches Gerät nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet daß der zweite Elektrodenschicht ein ununterbrochene Metallschicht ist und der erste Elektrodenschicht zumindest drei Elektroden enthält, wovon die mittlere sich gegenüber der zweiten MEMS Elektrode angeordnet ist.

4.           Elektronisches Gerät nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet daß der zweite Elektrodenschicht an der Oberfläche angeordnet ist, die nach der zweiten MEMS Elektrode aussieht.

25

5. Elektronisches Gerät nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet daß die mittlere Elektrode der erste Elektrodenschicht parallel zu der Fläche durch das piezoelektrische Element eine geringe Ausdehnung hat, so daß unter Anwendung einer Aktuationsspannung zwischen den Elektroden an gegenüberliegenden Seiten des
- 5 piezoelektrischen Schichtes eine Verformung des piezoelektrischen Schichtes in einer Richtung parallel zu dem von der Aktuationsspannung erzeugten elektrischen Feldes statt findet.

## ZUSAMMENFASSUNG:

Das der Erfindung gemäß verbesserte Gerät umfaßt einen mikro-electromechanischen Schalter (MEMS) mit einem piezoelektrischen Element, das beidseitig, an den Rändern, an einer mechanischen Unterstützung verbunden ist. Der Elektrodenentwurf dieses piezoelektrischen Elementes ist dadurch gekennzeichnet, daß es an zumindest einer  
5 der Oberfläche zwei Elektroden gibt.

Fig. 4





1/9

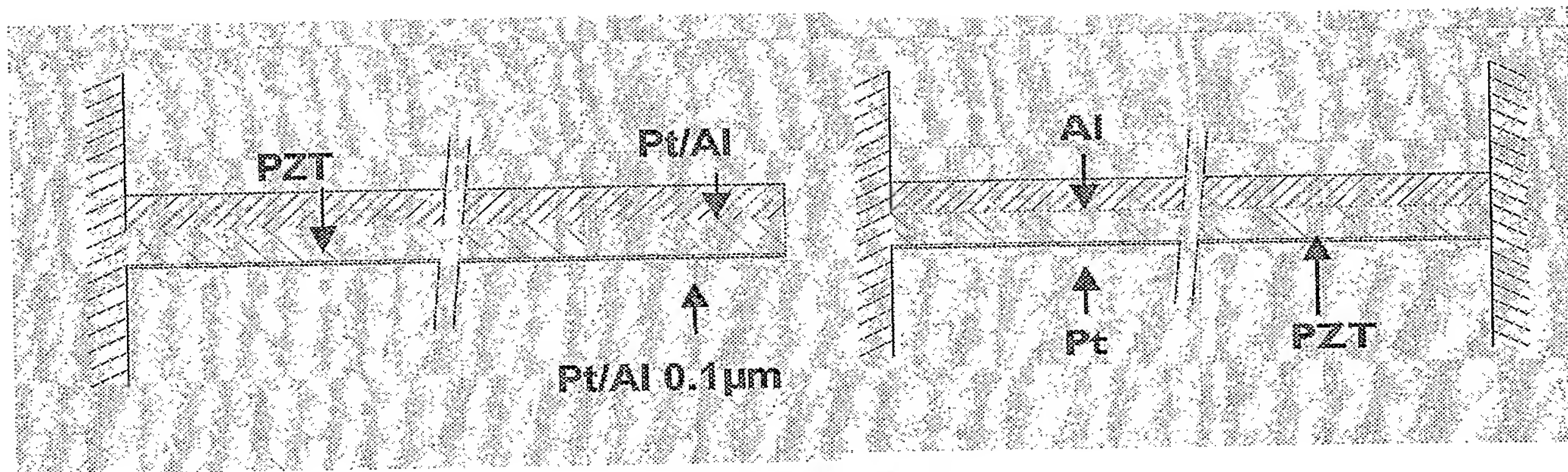


FIG.1

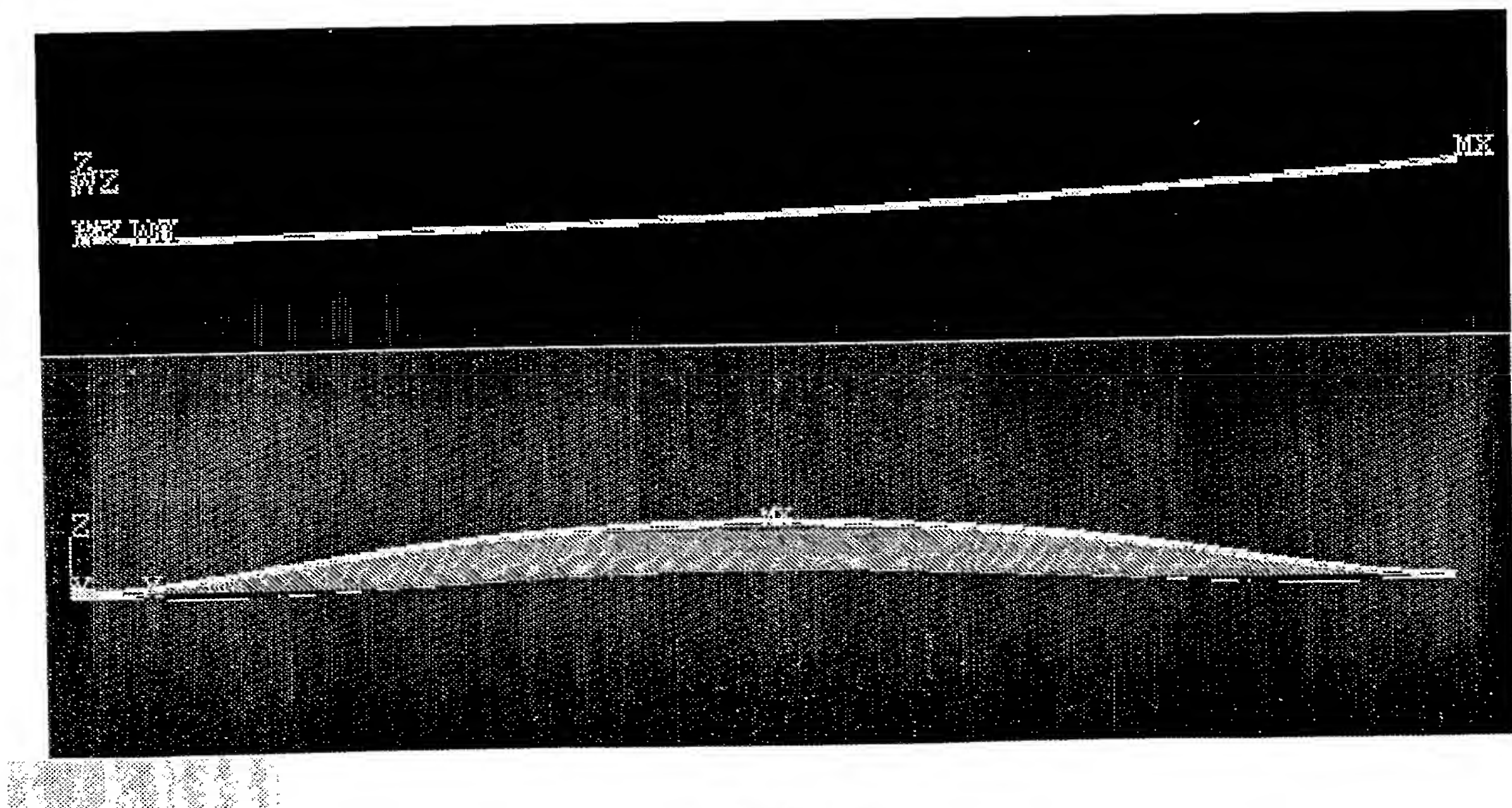


FIG.2

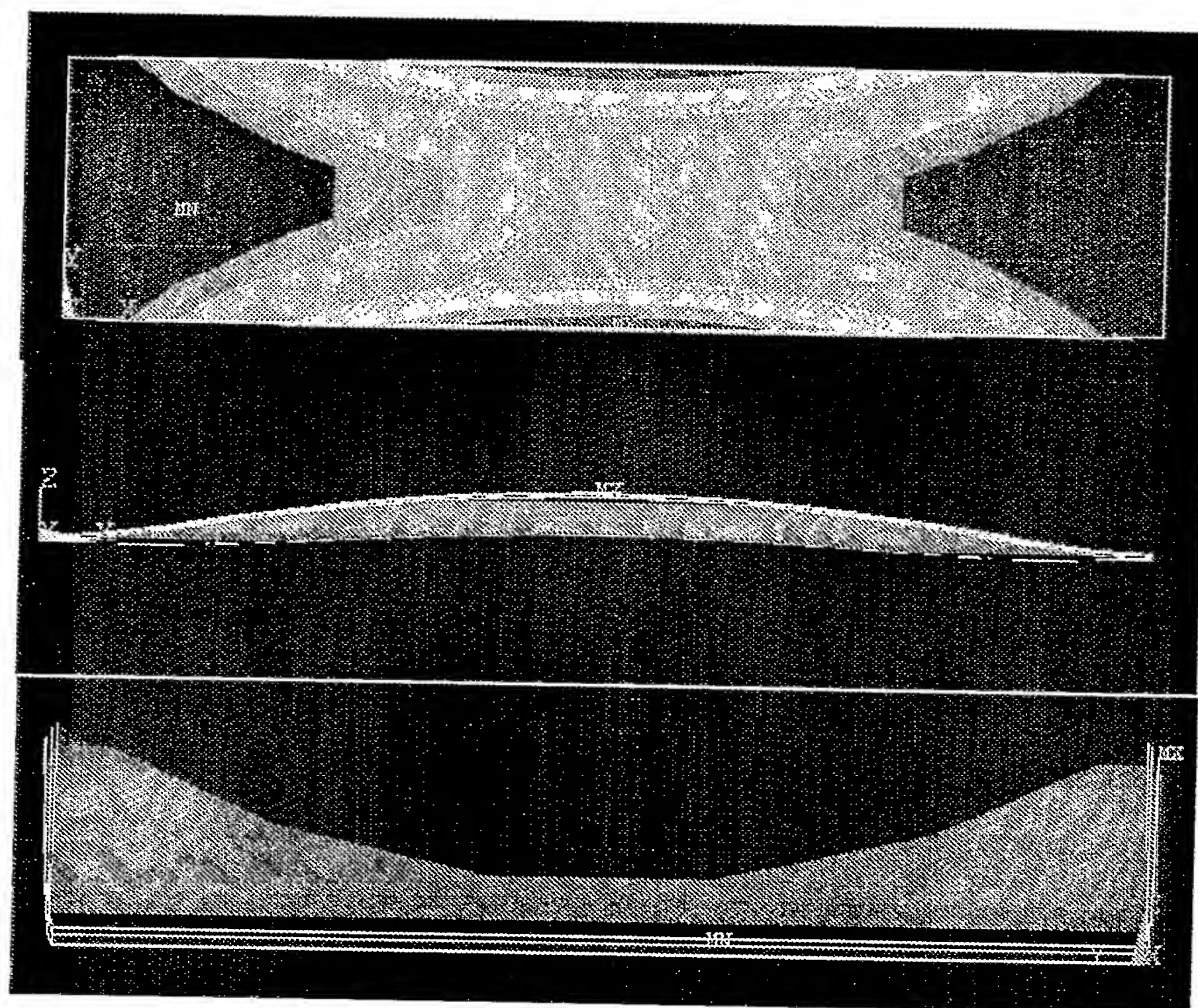


FIG.3

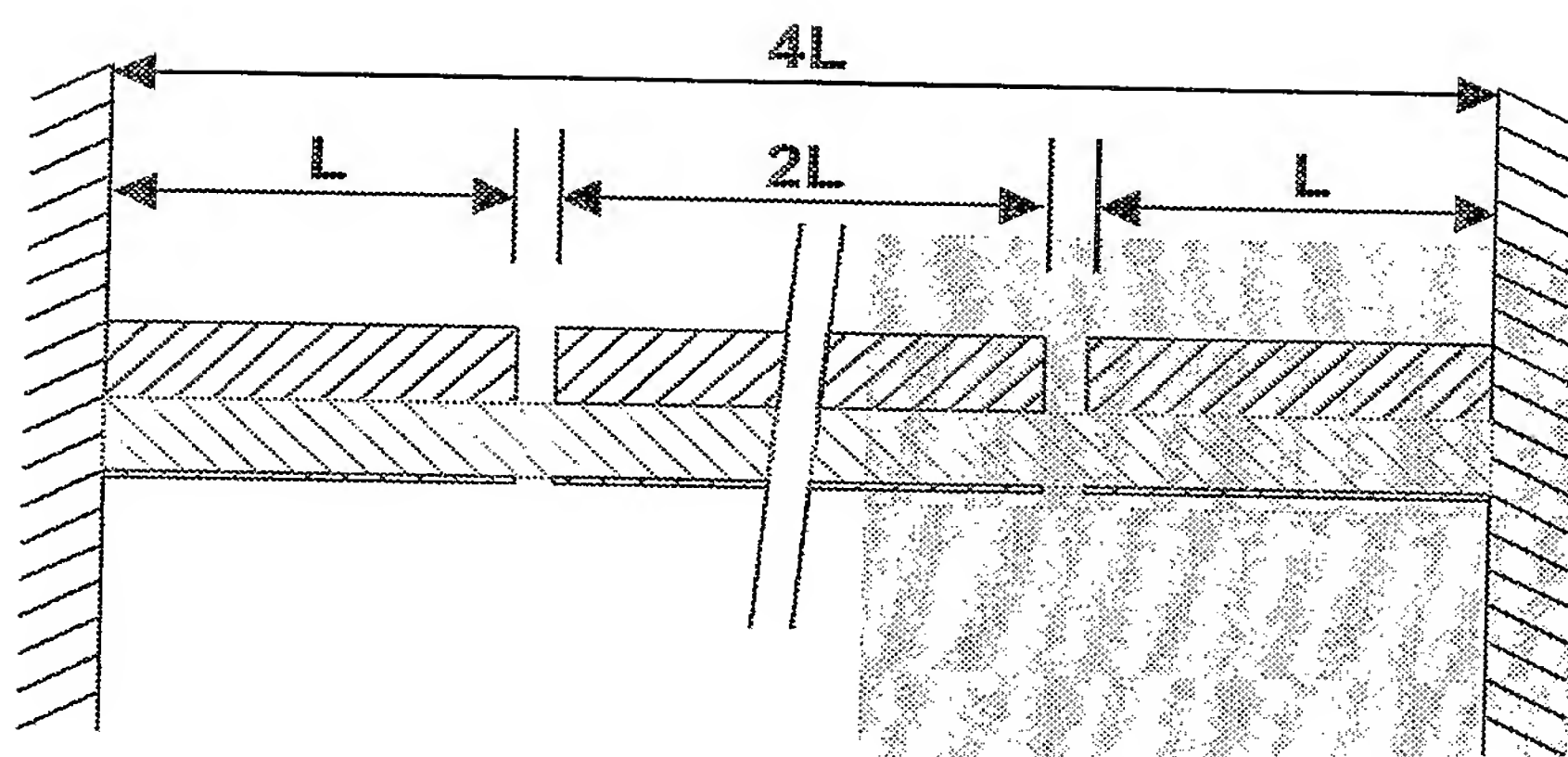


FIG.5



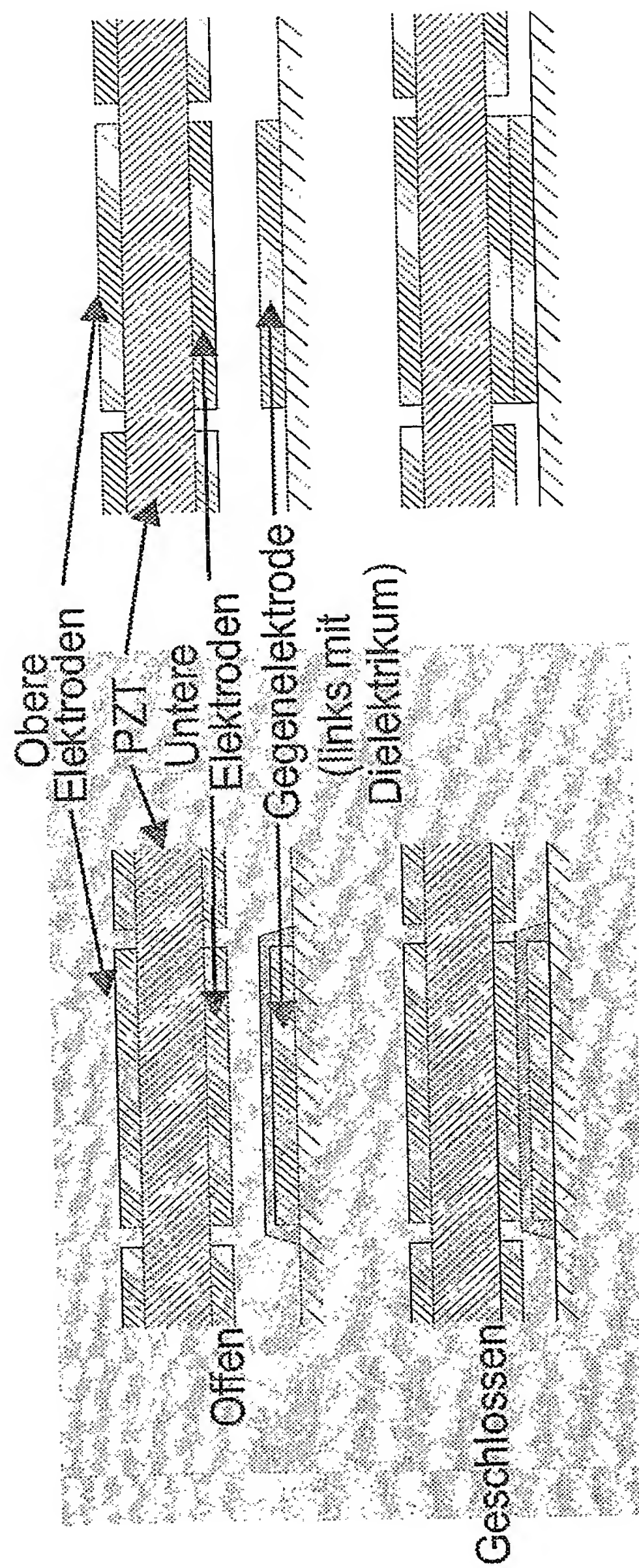


FIG.4

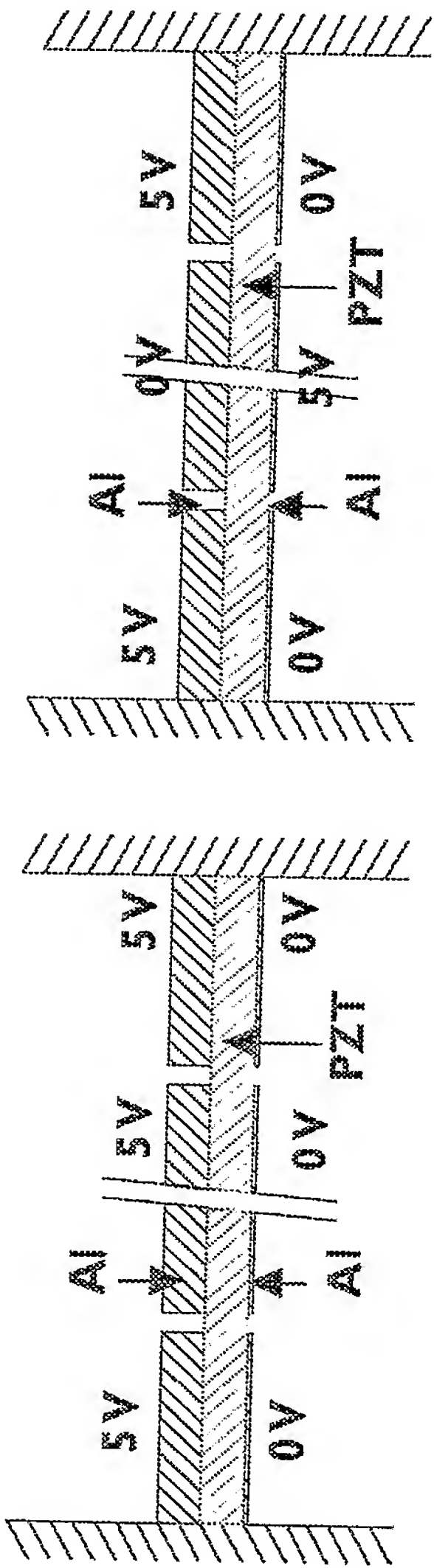


FIG.6



5/9

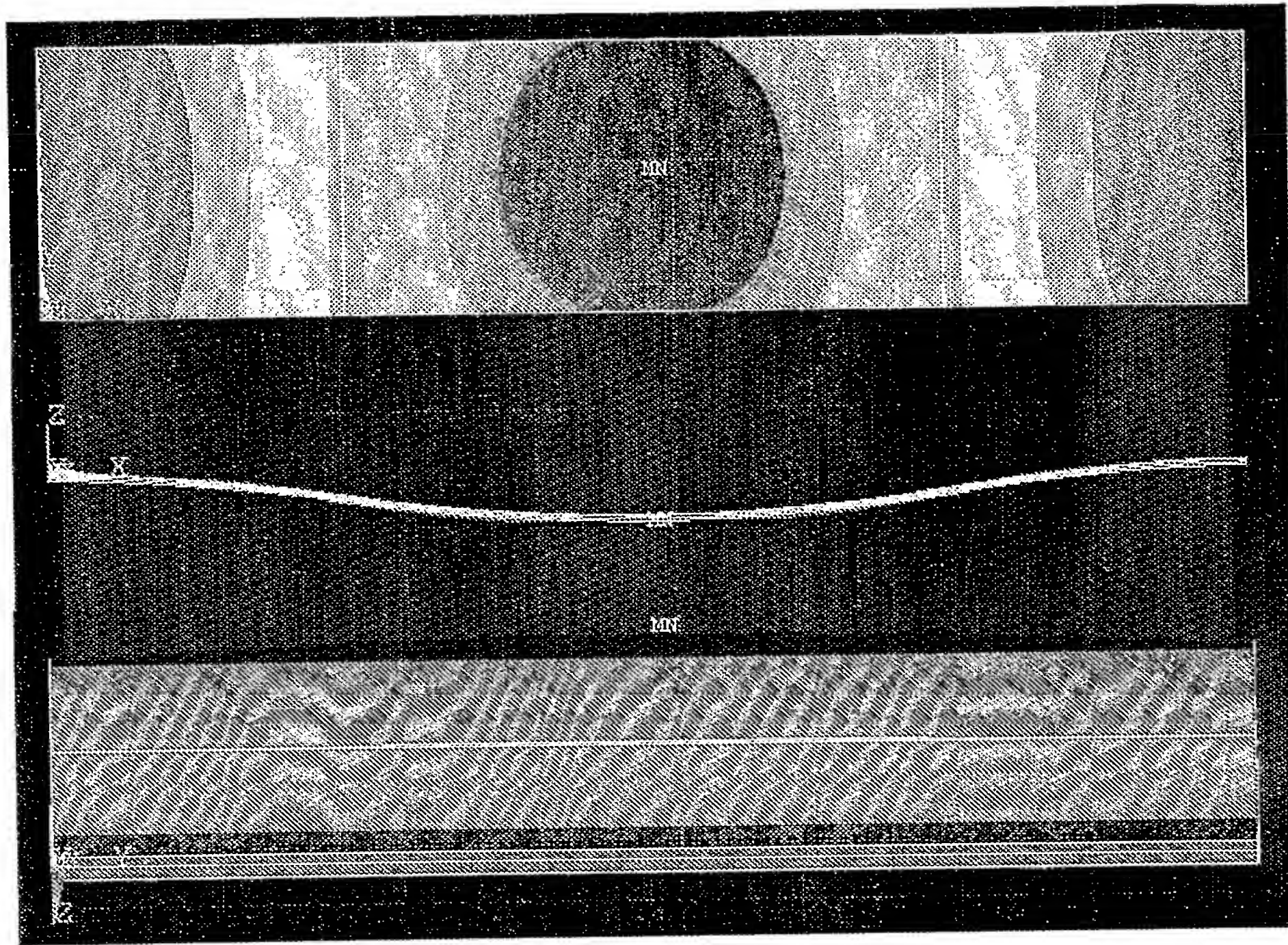
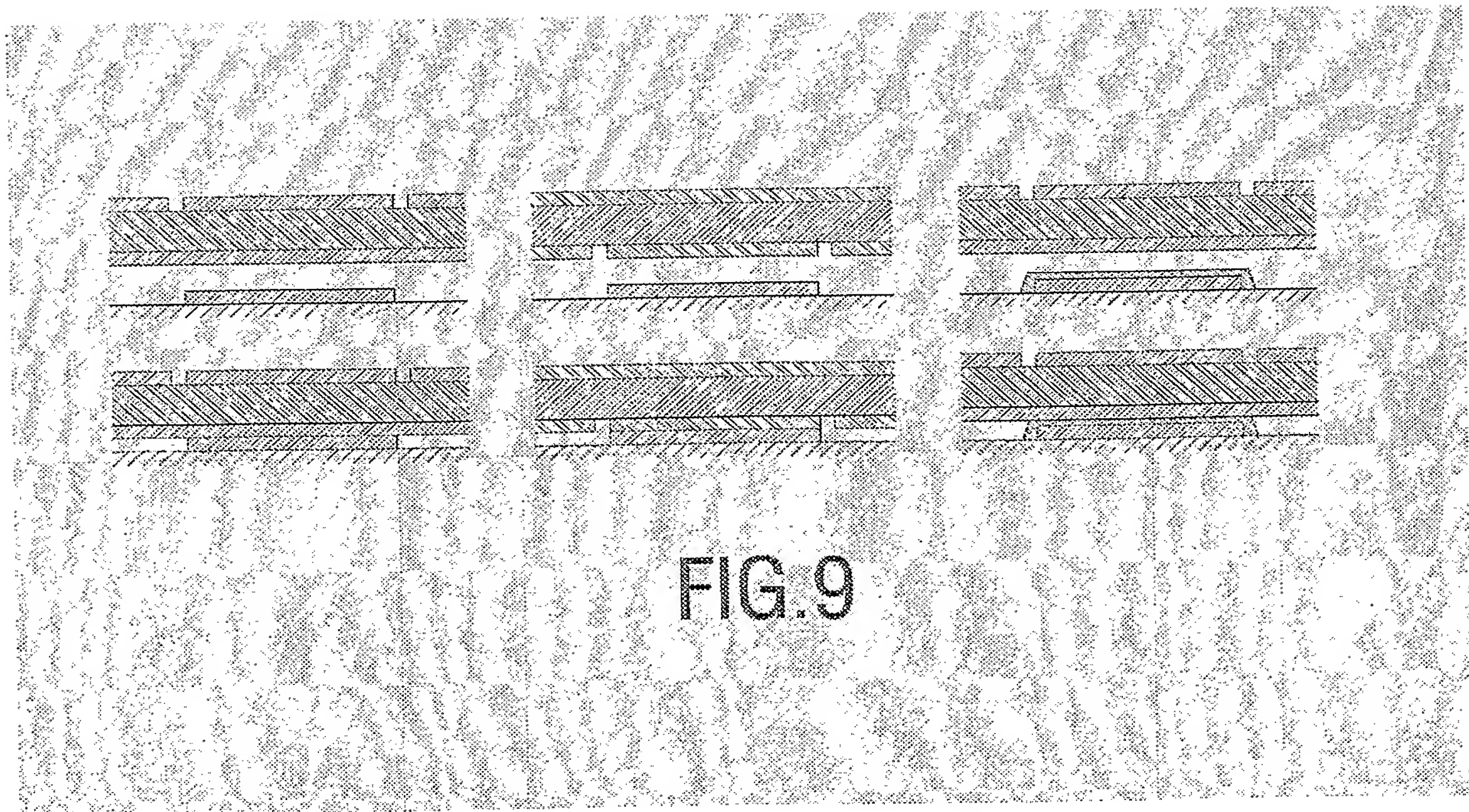


FIG.7





6/9

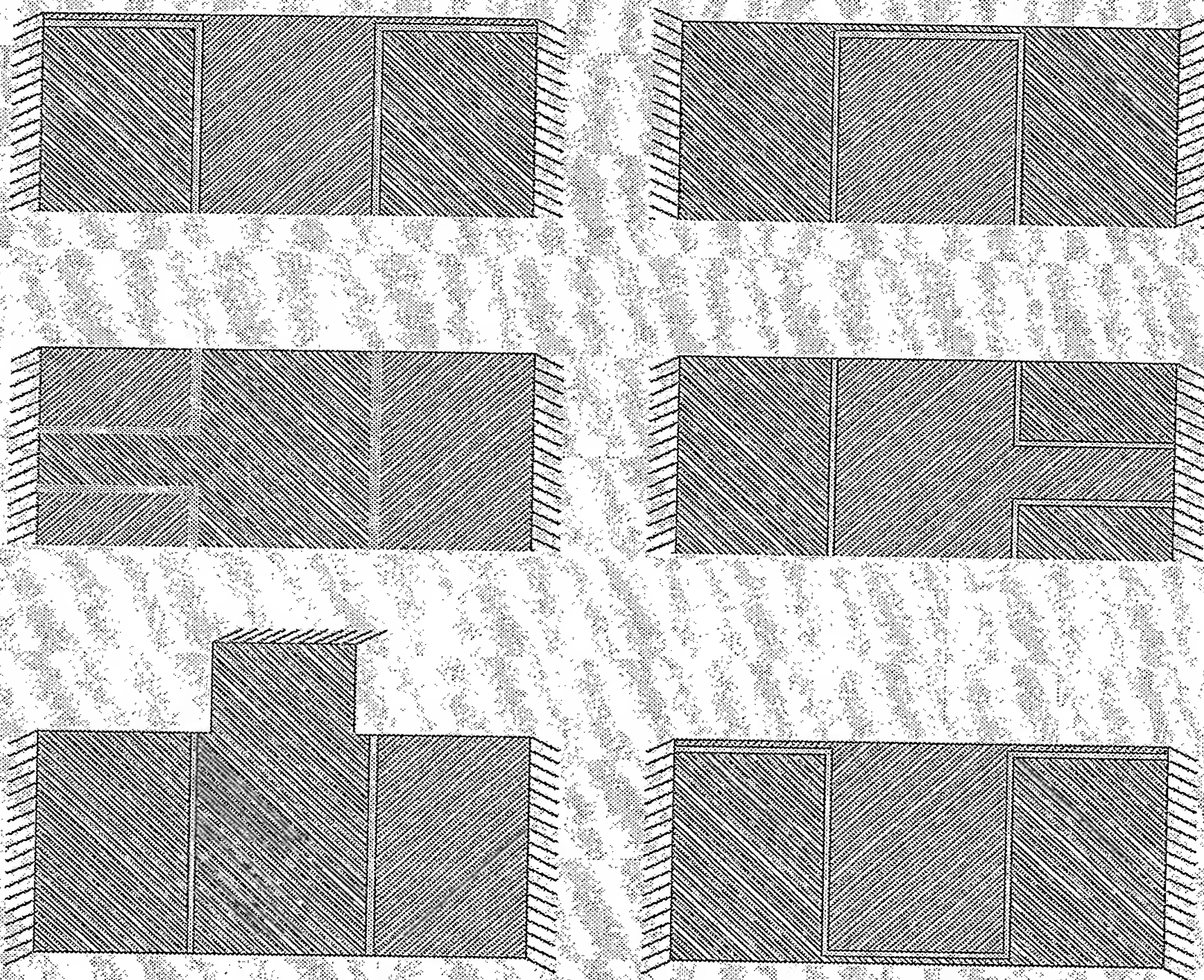


FIG.8



7/9

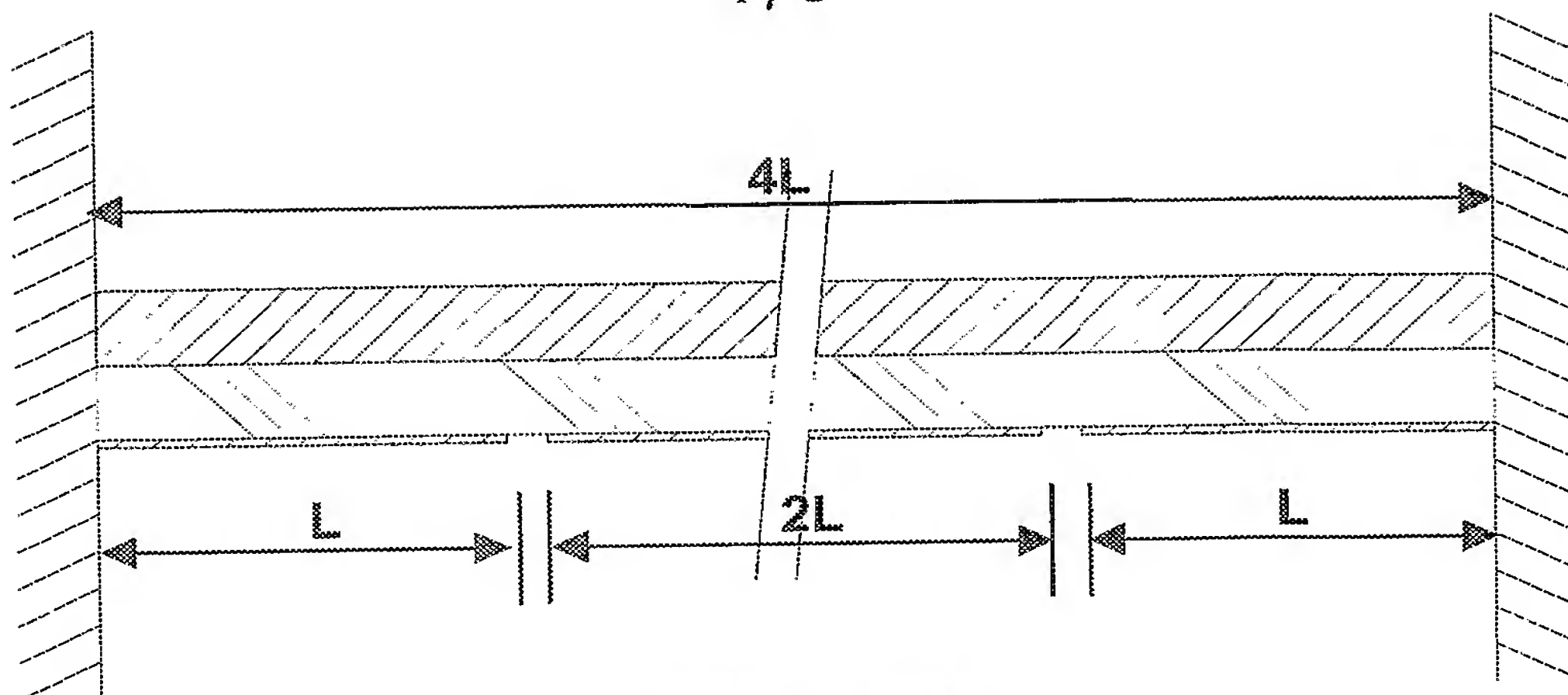


FIG.10

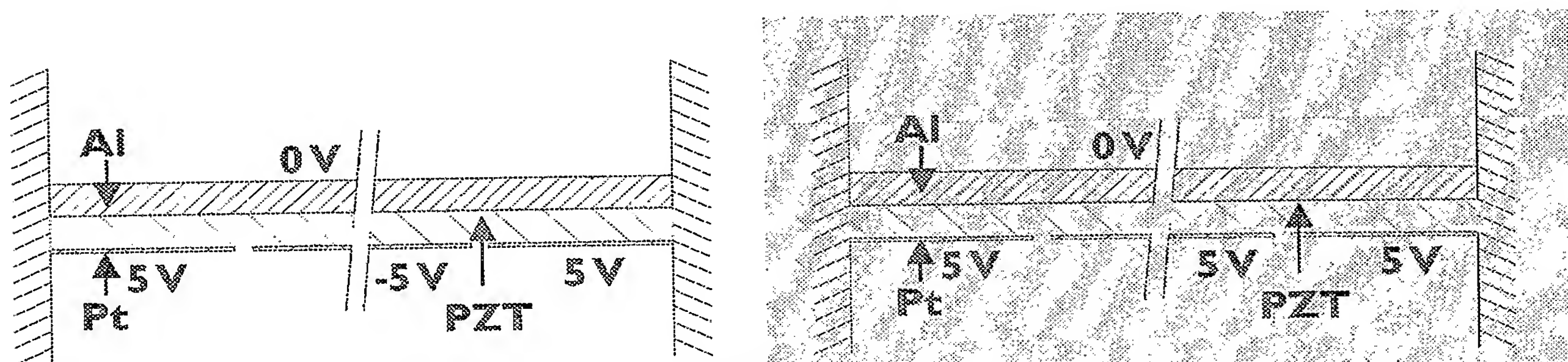


FIG.11

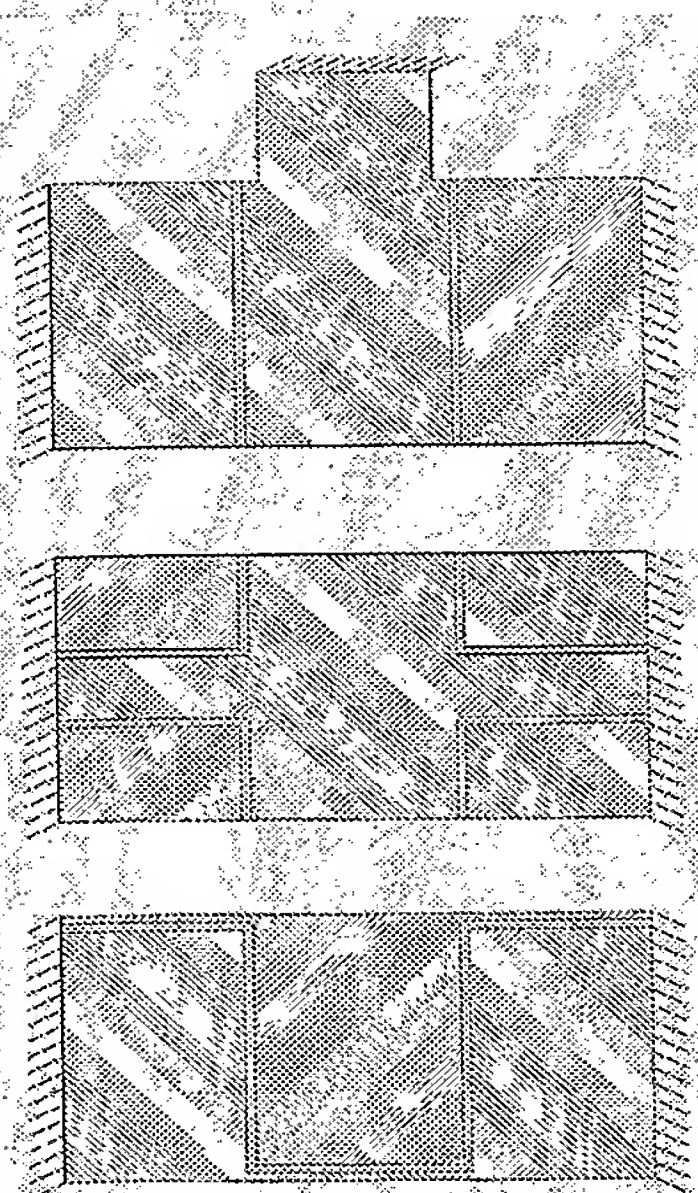


FIG.12

8/9

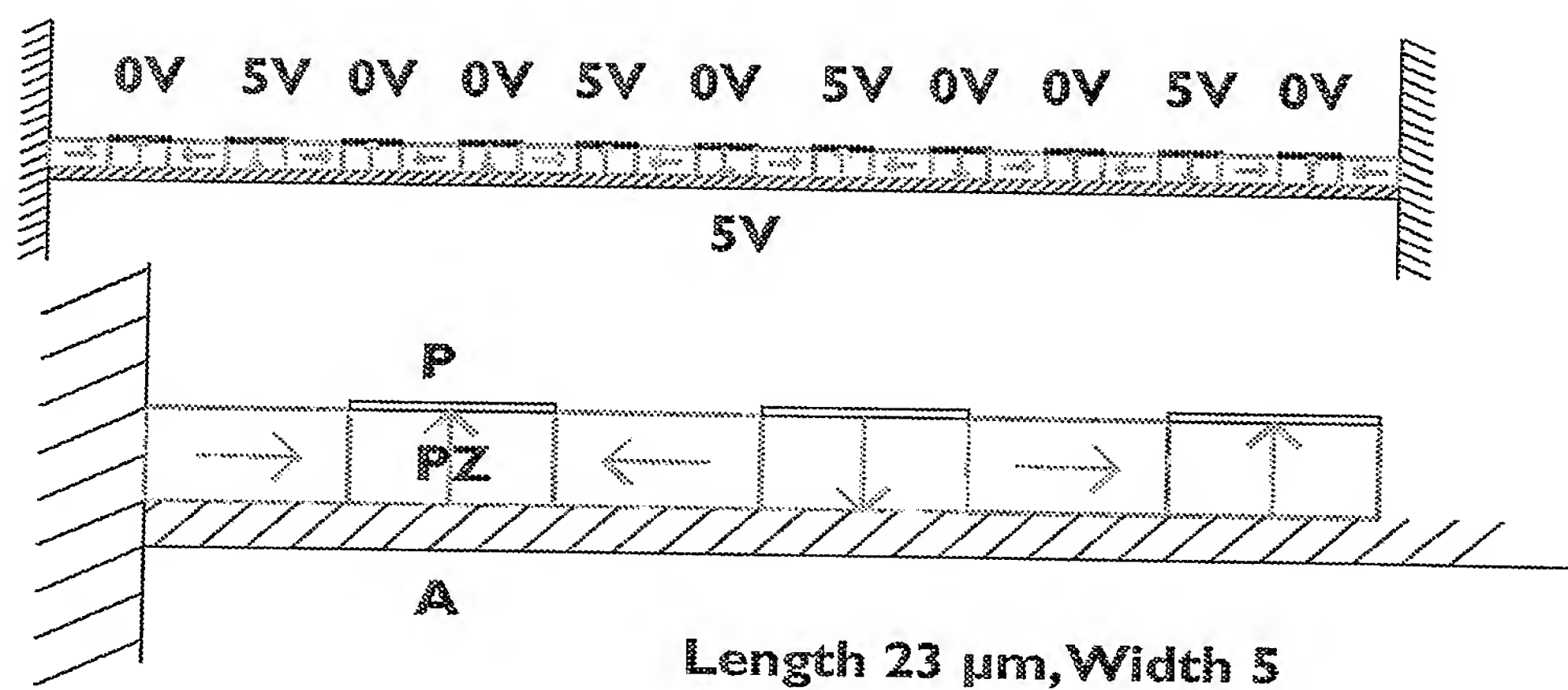


FIG.13

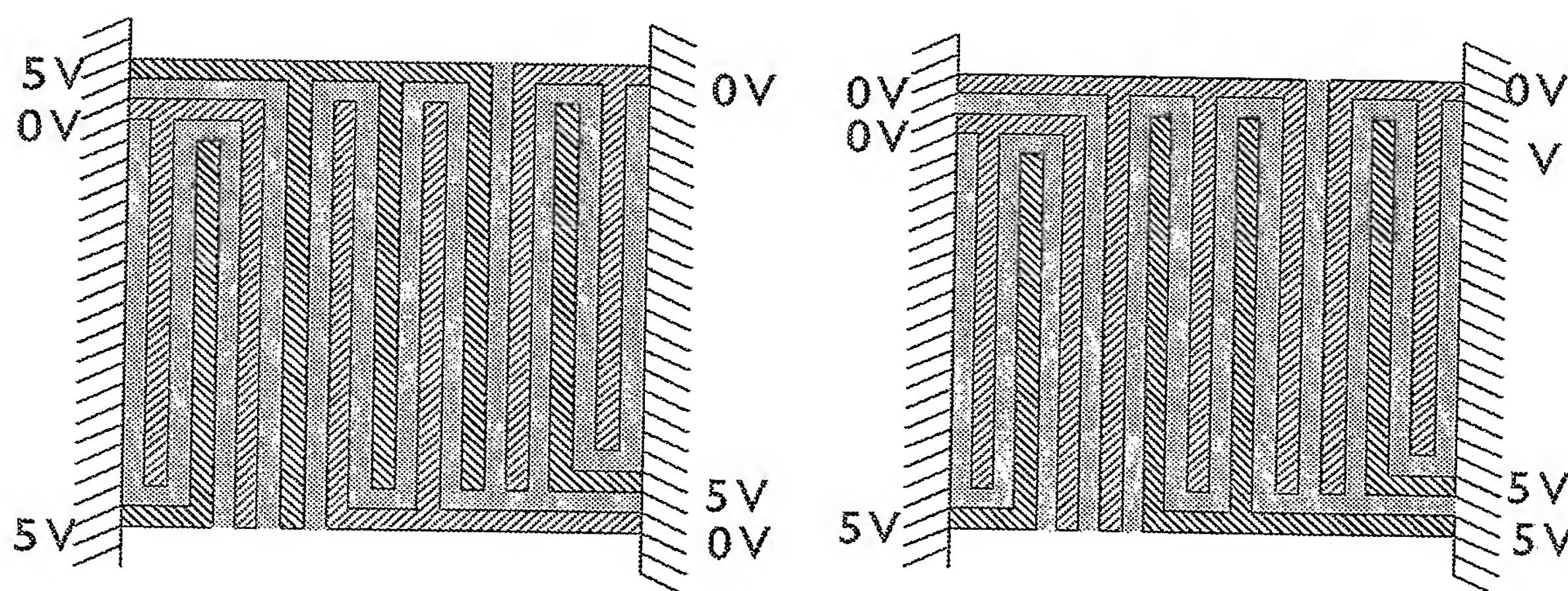


FIG.14



9/9

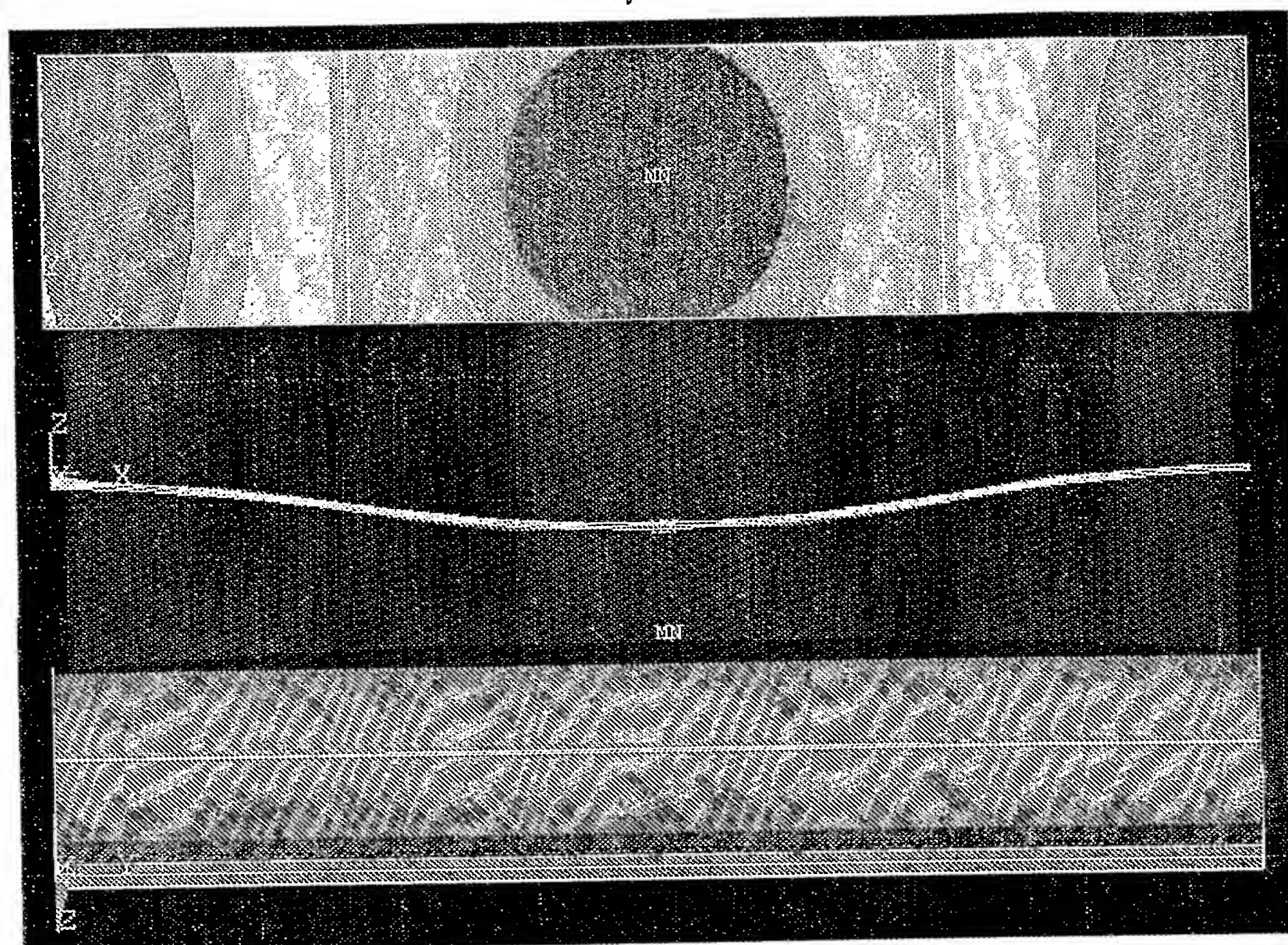


FIG. 15

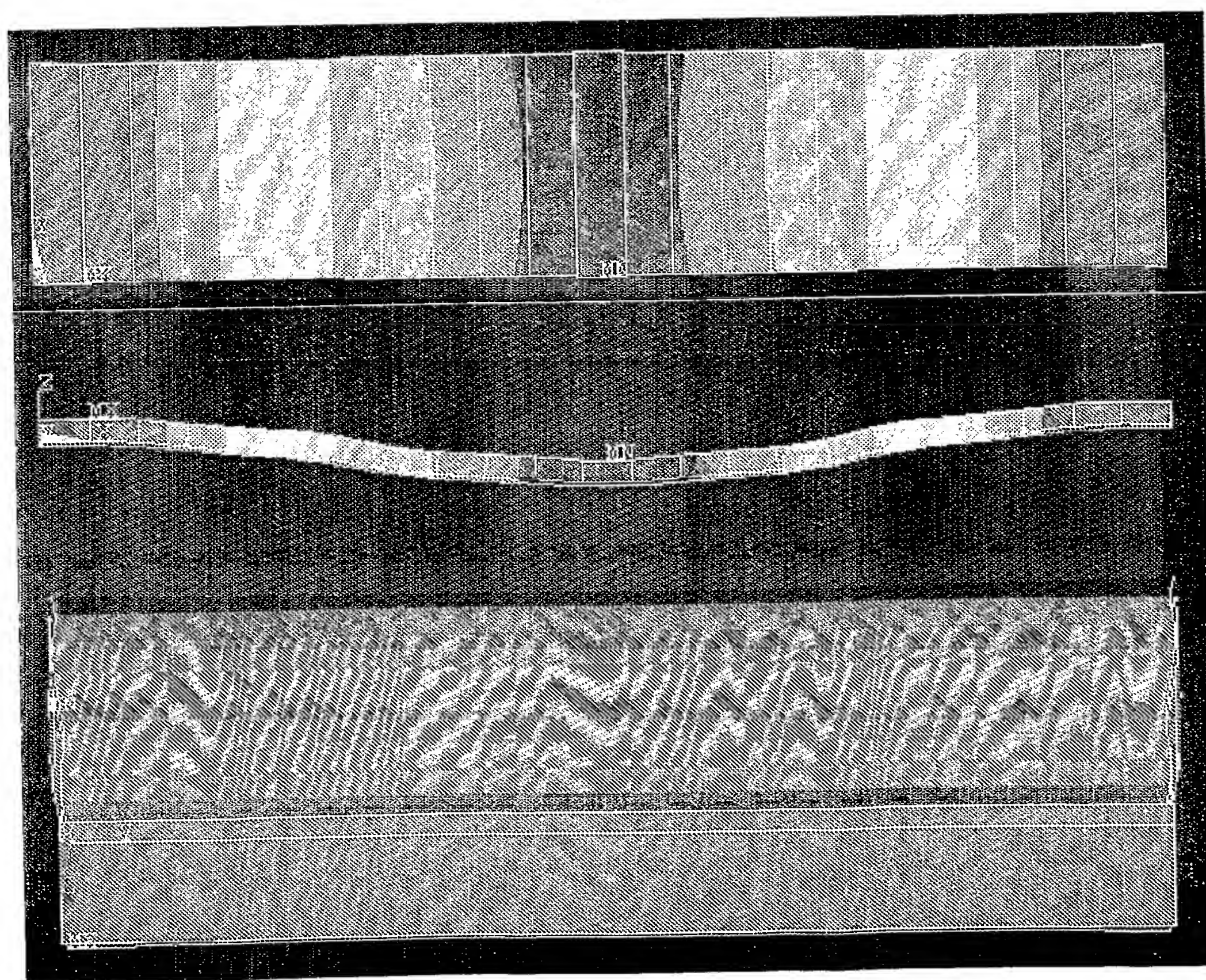


FIG. 16



PCT/IB2004/052881

